

УДК 53.06

## Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава

П. В. Борисов, А. А. Воробьев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Евстафьев А. М., Борисов П. В., Воробьев А. А.* Обзор алгоритма программного обеспечения для диагностики остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 471–477. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-471-477

### Аннотация

**Цель:** Обзор алгоритма оценки остаточного ресурса литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи в процессе функциональной диагностики накопителя электрической энергии, основанного на базе измерения возмущающих воздействий пульсаций протекающего тока. **Методы:** Используя результат ранее проведенных экспериментальных исследований по измеряемым параметрам литий-ионной аккумуляторной батареи при работе с преобразователем электрической энергии, предполагается набор статистических данных, который посредством описанного алгоритма будет производить оценку остаточного ресурса элемента батареи. **Результаты:** Рассмотрен алгоритм программного обеспечения функциональной диагностики литий-ионной аккумуляторной батареи при работе в звене постоянного тока с преобразователем частоты на основании ранее проведенного физического эксперимента по набору статистических параметров литий-ионной батареи в процессе эксплуатации. **Практическая значимость:** Проведенный обзор статистических данных исследуемого накопителя дает возможность проведения функциональной диагностики определения текущего ресурсного состояния литий-ионной аккумуляторной батареи.

**Ключевые слова:** Литий-ионная аккумуляторная батарея, функциональная диагностика, программное обеспечение, алгоритм диагностики.

### Введение

В процессе решения задачи диагностирования накопителя литий-ионного аккумулятора (ЛИА) тягового подвижного состава (ТПС) производится исследование основных параметров ЛИА ТПС, удовлетворяющих условиям эксплуатации ТПС. Если представить ЛИА ТПС в обобщенном виде, в качестве диагностического объекта (ОД), то диагностический процесс представляет собой повторную подачу определенных входных воздействий на ОД, изображенных на рис. 1, измерение и анализирование ответов, поступающих от средств диагностирования (СД) на входы объекта, являющиеся внешними (рабочими) сигналами, определя-

емыми алгоритмом работы устройства. Измерение, а также анализ реакций ОД всегда выполняется с помощью СД. Взаимодействие объектов и средств образует систему диагностирования [1].

Для создания гибридной силовой установки для перспективного транспортного средства целесообразна топология, при которой каждый накопительный источник энергии подключается к общей шине постоянного тока через двунаправленные преобразователи постоянного тока [2]. Поскольку двунаправленный преобразователь постоянного тока подключен между каждым устройством накопления энергии и общей шиной постоянного тока, теоретически количе-

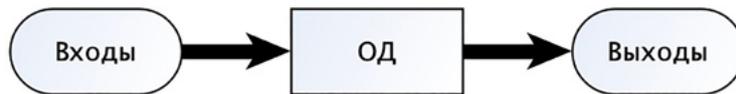


Рис. 1. Процесс объекта диагностирования

ство источников и преобразователей может быть неограниченным [3].

Основная задача системы управления энергопотреблением гибридной силовой установки — управлять потреблением, генерацией и хранением энергии для обеспечения максимальной эффективности всей системы. Разработка единой системы управления энергопотреблением и мгновенной мощностью представляет собой сложное сочетание нескольких локальных задач, которые можно сформулировать следующим образом: выработка электроэнергии; мониторинг качества и стабильности электроэнергии; координация потоков энергии и мощности [4].

Для контроля качества и стабильности электроэнергии гибридной установки совместно с ЛИА в процессе эксплуатации преобразователя электрической энергии, работающего совместно с ЛИА электрическим аккумулятором, необходимо иметь информацию о степени заряженности аккумулятора SOC (State of Charge) [5] для того, чтобы прогнозировать возможность дальнейшей работы ТПС, питаемой от аккумулятора, или принять решение о зарядке этого аккумулятора [6]. В процессе непрерывно длительной эксплуатации ЛИА также важно знать остаточную емкость, когда его характеристики выйдут за допустимые эксплуатационные пределы и потребуются его замена.

При обслуживании ЛИА по текущему состоянию известно два метода диагностирования:

1. Система тестовой диагностики [1] (рис. 2) обеспечивает тестовые воздействия на объект от средств диагностирования. Других сигналов на объект не поступает. Следовательно, как состав, так и последовательность этих воздействий могут быть выбраны исходя из условий эффективной организации диагностического процесса. Каждое

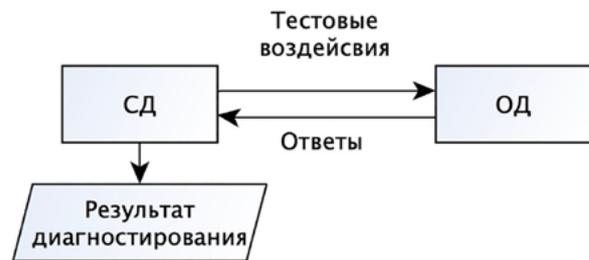


Рис. 2. Система тестового диагностирования технического состояния объекта

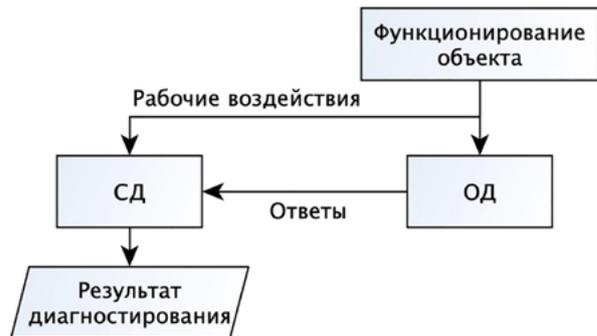


Рис. 3. Система функционального диагностирования технического состояния объекта

следующее воздействие может быть назначено в зависимости от реакции объекта на предыдущее воздействие. Воздействие в такой системе называется испытанием. Примером тестовой диагностики является тестирование батарей на стенде.

2. Система функциональной диагностики [1] (рис. 3) не предусматривает того, чтобы диагностическое средство производило тестовое воздействие на объект. ОД и СД получают рабочие воздействия, предусмотренные алгоритмом функционирования объекта. СД работает во время рабочего функционирования ОД, а также решает задачу правильного функционирования и устранения неполадок, которые мешают нормальному функционированию. Примером функ-

циональной диагностики служит получение данных о текущем состоянии дизельной установки локомотива по угару масла повышению расхода топлива при той же вывозной работе [7, 8].

### Алгоритм программного обеспечения ЛИА накопителя для ТПС

Данный алгоритм, составленный в соответствии с [9], изображенный на рис. 4 определения остаточного ресурса ЛИА для ТПС, относится к средствам функциональной диагностики накопителя. Алгоритм основан на ранее проведенных работах [10]. Для определения данных о текущих значениях тока, напряжения, каждой ячейки ЛИА в накопителе должны быть предусмотрены соответствующие датчики.

В качестве исходных данных, перечисленных на рис. 4, а, применяются данные: элементов эквивалентной схемы замещения  $R_{0(n-1)}$ ,  $R_{1(n-1)}$  и  $C_{0(n-1)}$ , число отработанных циклов  $n_{\text{отраб}}$ , уровень заряда SOC, фиксируется режим работы (разряд/заряд), а также температура ячеек ЛИА. На этом этапе также фиксируется значение остаточного ресурса на момент цикла, для нового аккумулятора значение равно полной рабочей емкости, а для ЛИА с частично отработанным ресурсом проводится калибровочный тест полного заряда/разряда согласно ГОСТ Р МЭК 62813—2020 [11]

Электрическая импедансная спектроскопия является часто используемой методикой для определения динамического поведения электрохимических систем [12–14]. Из пульсирующего тока выводится комплексный импеданс, который описывает передаточную функцию исследуемой системы и содержит информацию о соотношении амплитуд и сдвиге фаз между напряжением и током для определенной частоты. Для нелинейных, близких к синусоидальной, форм тока и напряжения,  $i(t)$  (1) и  $u(t)$  (2), определенной частоты  $f$  и с амплитудами  $\hat{i}$  и  $\hat{u}$ , комплексный импеданс  $Z(f)$  (3) (рис. 4, б):

$$i(t) = \hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)} = \hat{I} \cdot e^{j(2\pi f t + \varphi_i)}; \quad (1)$$

$$u(t) = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \hat{U} \cdot e^{j(2\pi f t + \varphi_u)}; \quad (2)$$

$$Z(f) = \frac{i(t)}{u(t)} = \frac{\hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}}{\hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_u)}} = \frac{\hat{I} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_i)}}{\hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_u)}}, \quad (3)$$

где  $Z(f)$  дает информацию о соотношении амплитуд, а  $\varphi$  — о сдвиге фаз.

Величины элементов эквивалентной схемы замещения ЛИА  $R_{0(n)}$ ,  $R_{1(n)}$  и  $C_{0(n)}$  сравниваются с ранее полученными значениями  $R_{0(n-1)}$ ,  $R_{1(n-1)}$  и  $C_{0(n-1)}$ , изображенными на рис. 4, в. Определение данных значений производится при фиксированном уровне SOC и соответствующем режиме работы ЛИА (рис. 4, г). Способ расчета величин (4–6) рассмотрен ранее в работе [10]:

$$R_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta I}; \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta I}; \quad (5)$$

$$C = \tau \frac{R_0 + R_1}{R_0 \cdot R_1}, \quad (6)$$

где  $\omega = \frac{1}{\tau}$  — частота сопряжения.

Уровень заряда SOC ЛИА определяется посредством метода Калмана [15–19], также допускаются определения заряженности ЛИА посредством кулоновского счета [20], в алгоритме может применяться любой способ определения SOC.

В качестве теоретического значения остаточного ресурса (рис. 4, д) высчитывается разница между общим количеством циклов, заявленных производителем  $n_{\text{всего}}$ , и числом отработанных циклов  $n_{\text{отраб}}$ .

Температура одиночных ячеек должна контролироваться, так как в процессе эксплуатации

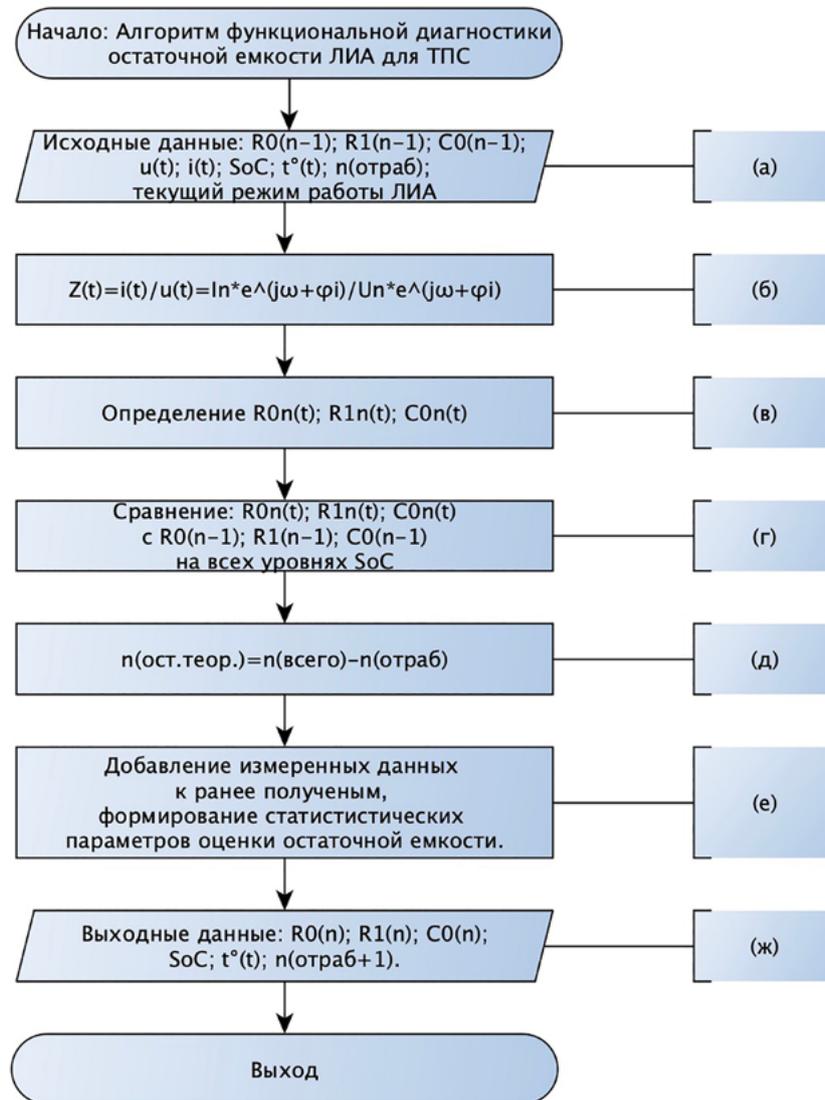


Рис. 4. Алгоритм определения остаточного ресурса

нагруженные ЛИА расходуют часть «бесполезной» на нагрев, от этого измеренные значения  $i(t)$  и  $u(t)$  могут отличаться на одном уровне заряда с одинаковой нагрузкой.

Внутреннее сопротивление ЛИА оказывает влияние на энергетические возможности батареи. При увеличении сопротивления энергоёмкость снижается. Более того, максимальное и минимальное напряжения достигаются раньше — во время зарядки или разрядки, что может заметно снизить «доступную» ёмкость.

Набор данных текущего цикла добавляется к ранее полученным значениям, формируя статисти-

стический ряд данных для формирования параметра оценки остаточной ёмкости (рис. 4, *e*).

На основании обработки выходных данных (рис. 4, *ж*) изменяется текущее значение остаточной ёмкости, из которых запоминается для сравнения со значениями следующего измерительного цикла.

Предложенный алгоритм диагностирования ЛИА предусматривает набор проверок и вычислений параметров ЛИА, которые проводятся во время рабочих воздействий; формируется массив результатов элементарных проверок, которые через устройство связи поступают на вход

блока расшифровки результатов. Получившийся результат сравнивается с ранее полученными значениями. Данные фиксируются на протяжении всей работы ЛИА совместно со статическим преобразователем энергии, на протяжении всех значений заряда, как в режиме заряда, так и разряда.

### Заключение

В данной статье был предложен алгоритм функционального диагностирования ЛИА ТПС при работе совместно с преобразователем энергии на основании ранних работ [10]. При оптимизированных значениях параметров накопителя может быть достигнуто соответствие между измеренным и предсказанным значениями батареи.

**Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».**

### Библиографический список

1. Сапожников В. В. Основы технической диагностики: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — М.: Маршрут, 2004. — 318 с.
2. Евстафьев А. М. Выбор топологии схем тягового привода электрического подвижного состава / А. М. Евстафьев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2010. — Вып. 3(24). — С. 89–98.
3. Власьевский С. В. Сравнение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным и асинхронным приводом / С. В. Власьевский, Д. В. Грибенюк, М. С. Алексеева // Вестник Ин-та тяги и подвижного состава. — 2016. — № 12. — С. 24–27.
4. Евстафьев А. М. Применение гибридных технологий в тяговом подвижном составе / А. М. Евстафьев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018. — С. 27–38.
5. ГОСТ Р МЭК 62660-2—2020. Аккумуляторы литий-ионные для электрических дорожных транспортных средств. Часть 2. Испытания на надежность и эксплуатацию с нарушением режимов. — М.: Стандартинформ, 2020.
6. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М.: Стандарты, 1990.
7. Грачев В. В. Оценка технического состояния теплового дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления / В. В. Грачев, М. Ш. Валиев // Известия ПГУПС. — 2010. — № 1(22). — С. 22–32.
8. Валиев М. Ш. Диагностика рабочего процесса теплового дизеля в условиях эксплуатации / М. Ш. Валиев // Вестник транспорта Поволжья. — Самара: Самарский государственный университет путей сообщения. — 2011. — № 1(25). — С. 35–39.
9. ГОСТ 19.701—90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения. — М.: Стандарт, 1992.
10. Борисов П. В. Исследование характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи / П. В. Борисов, А. А. Воробьев, К. В. Константинов и др. // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 1. — С. 207–221. — DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221.
11. ГОСТ Р МЭК 62813—2020. Конденсаторы литий-ионные для электрического и электронного оборудования. Методы испытаний электрических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2021.
12. Липкин М. С. Диагностика литий-ионных аккумуляторов методами электрохимического импеданса / М. С. Липкин, Е. В. Корбова, М. В. Луковкин и др. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2023. — № 1. — С. 43–48. — DOI: 10.17213/1560-3644-2023-1-43-48.
13. Lasia A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications / A. Lasia // Modern Aspects of Electrochemistry. — 1999. — Vol. 32. — P. 143.
14. Macdonald J. R. Impedance spectroscopy / J. R. Macdonald // Ann Biomed Eng. — 1992. — Iss. 20(3). — Pp. 289–305.
15. Сяоган У. Определение уровня заряда литий-ионного аккумулятора на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана / У. Сяоган, С. Ли, Н. И. Щуров и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технология. — 2020. — Вып. 13(4). — С. 420–437. — DOI: 10.17516/1999-494X-0242.
16. Zhang J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery / J. Zhang, J. Lee // Journal of Power Sources. — 2011.
17. Plett G. L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs / G. L. Plett // Journal of Power Sources. — 2004.

18. Yuan S. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model / S. Yuan, H. Wu, C. Yin // *Energies*. — 2013. — Iss. 6(1). — Pp. 444–470.

19. He W. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering / W. He, N. Williard, Ch. Chen et al. // *Microelectronics Reliability*. — 2013. — Iss. 53(6). — Pp. 840–847. — DOI: 10.1016/j.microrel.2012.11.010.

20. Aylor J. H. A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs / J. H. Aylor, A. Thieme, B. W. Johnso //

*IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 1992. — Iss. 39(5). — Pp. 398–409. — DOI: 10.1109/41.161471.

Дата поступления: 05.05.2023

Решение о публикации: 30.05.2023

#### Контактная информация:

БОРИСОВ Павел Владимирович — аспирант;  
borisovpavel10@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук,  
доц.; 79219751198@yandex.ru

## Review of the Software Algorithm for Diagnosing the Residual Life of Lithium-Ion Batteries of Traction Rolling Stock

P. V. Borisov, A. A. Vorob'ev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Evstafiev A. M., Borisov P. V., Vorob'ev A. A. Review of the Software Algorithm for Diagnosing the Residual Life of Lithium-Ion Batteries of Traction Rolling Stock // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 471–477. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-471-477

### Summary

**Purpose:** Review of the algorithm for assessing the residual life of the lithium iron phosphate battery in the process of functional diagnostics of the electric energy storage device, based on the measurement of disturbing influences of current pulsations. **Methods:** Using the result of previously conducted experimental studies on the measured parameters of the lithium-ion battery pack when working with the electric energy converter, a set of statistic data is assumed, which by means of the described algorithm will produce an estimate of the remaining life of the battery cell. **Results:** The software algorithm for functional diagnostics of the lithium-ion battery pack when working in the direct current link with the frequency converter based on the previously conducted physical experiment that collected statistical parameters of the lithium-ion battery pack in operation is considered. **Practical significance:** The conducted review of the statistical data of the investigated storage device gives the possibility to carry out functional diagnostics of the current resource state of the lithium-ion battery pack.

**Keywords:** Lithium-ion battery pack, functional diagnostics, software, diagnostic algorithm.

### References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transporta* [Fundamentals of technical diagnostics: textbook. allowance for universities railway transport]. Moscow: Marshrut Publ., 2004, 318 p. (In Russian)

2. Evstaf'ev A. M. Vybor topologii skhem tyagovogo privoda elektricheskogo podvizhnogo sostava [Choice of topology of schemes of traction drive of electric rolling stock]. *Izv. Peterb. un-ta putey soobshcheniya* [Izv.

Petersburg. University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2010, Iss. 3(24), pp. 89–98. (In Russian)

3. Vlas'evskiy S. V., Gribenyuk D. V., Alekseeva M. S. Sravnenie energeticheskoy effektivnosti elektrovozov peremennogo toka s kollektornym i asinkhronnym privodom [Comparison of the energy efficiency of alternating current electric locomotives with a collector and asynchronous drive]. *Vestnik In-ta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock]. 2016, Iss. 12, pp. 24–27. (In Russian)

4. Evstaf'ev A. M. *Primenenie gibridnykh tekhnologiy v tyagovom podvizhnom sostave* [Application of hybrid technologies in traction rolling stock]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2018, pp. 27–38. (In Russian)
5. *GOST R MEK 62660-2—2020. Akkumulyatory litiy-ionnye dlya elektricheskikh dorozhnykh transportnykh sredstv. Chast' 2. Ispytaniya na nadezhnost' i ekspluatatsiyu s narusheniem rezhimov* [GOST R IEC 62660-2—2020. Lithium-ion batteries for electric road vehicles. Part 2. Tests for reliability and operation with violation of modes]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. (In Russian)
6. *GOST 20911—89. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [GOST 20911—89. Technical diagnostics. Terms and Definitions]. Moscow: Standarty Publ., 1990. (In Russian)
7. Grachev V. V., Valiev M. Sh. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznogo dizelya po dannym bortovoy mikroprotseornoy sistemy upravleniya [Assessment of the technical condition of a diesel engine according to the data of the onboard microprocessor control system]. *Izvestiya PGUPSa* [Izvestiya PGUPS]. 2010, Iss. 1(22), pp. 22–32. (In Russian)
8. Valiev M. Sh. Diagnostika rabocheho protsessa teplovoznogo dizelya v usloviyakh ekspluatatsii [Diagnostics of the working process of a diesel locomotive under operating conditions]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. Samara: Samarskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Publ., 2011, Iss. 1(25), pp. 35–39. (In Russian)
9. *GOST 19.701—90. Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Oboznacheniya uslovnye i pravila vypolneniya* [GOST 19.701—90. Edinaya sistema programmnoy dokumentatsii. Skhemy algoritmov, programm, dannykh i sistem. Oboznacheniya uslovnye i pravila vypolneniya]. Moscow: Standart Publ., 1992. (In Russian)
10. Borisov P. V., Vorob'ev A. A., Konstantinov K. V. et al. Issledovanie kharakteristik litiy-ionnoy akkumulyatornoy batarei [Investigation of the characteristics of a lithium-ion battery]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2023, vol. 20, Iss. 1, pp. 207–221. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-207-221. (In Russian)
11. *GOST R MEK 62813—2020. Kondensatory litiy-ionnye dlya elektricheskogo i elektronnoho oborudovaniya. Metody ispytaniy elektricheskikh kharakteristik* [GOST R IEC 62813—2020. Li-ion capacitors for electrical and electronic equipment. Test methods for electrical characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian)
12. Lipkin M. S., Korbova E. V., Lukovkin M. V. et al. Diagnostika litiy-ionnykh akkumulyatorov metodami elektrokhimicheskogo impedansa [Diagnostics of lithium-ion batteries by electrochemical impedance methods]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki* [Izv. universities. North-Kavk. region. Tech. Sciences]. 2023, Iss. 1, pp. 43–48. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-1-43-48. (In Russian)
13. Lasia A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. *Modern Aspects of Electrochemistry*, 1999, vol. 32, p. 143.
14. Macdonald J. R. Impedance spectroscopy. *Ann Biomed Eng*, 1992, Iss. 20(3), pp. 289–305.
15. Syaogan U., Li S., Shchurov N. I. et al. Opredelenie urovnya zaryada litiy-ionnogo akkumulyatora na osnove algoritma rasshirennoho fil'tra Kalmana [Determining the charge level of a lithium-ion battery based on the extended Kalman filter algorithm]. *Zhurn. Sib. feder. un-ta. Tekhnika i tekhnologiya* [Zh. Sib. feder. university Technique and technology]. 2020, Iss. 13(4), pp. 420–437. DOI: 10.17516/1999-494X-0242. (In Russian)
16. Zhang J., Lee J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery. *Journal of Power Sources*, 2011.
17. Plett G. L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs. *Journal of Power Sources*, 2004.
18. Yuan S., Wu H., Yin C. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model. *Energies*, 2013, Iss. 6(1), pp. 444–470.
19. He W., Williard N., Chen Ch. et al. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering. *Microelectronics Reliability*, 2013, Iss. 53(6), pp. 840–847. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.11.010.
20. Aylor J. H., Thieme A., Johnso B. W. A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1992, Iss. 39(5), pp. 398–409. DOI: 10.1109/41.161471.

Received: May 05, 2023

Accepted: May 30, 2023

#### Author's information:

Pavel V. BORISOV — Postgraduate Student;

borisovpavel10@yandex.ru

Alexander A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering,

Associate Professor; 79219751198@yandex.ru